

論文

[2114] 組紐状 AFRP ロッドで補強した RC スラブの耐衝撃性に関する実験的研究

正会員○三上 浩 (三井建設土木設計部)

正会員 加藤正利 (三井建設土木設計部)

正会員 田村富雄 (三井建設技術研究所)

正会員 岸 徳光 (室蘭工業大学建設システム工学科)

1. はじめに

最近、コンクリートの補強材として新素材繊維材料(FRPロッド)を用いる研究が盛んに行われ、一部では実構造物にも適用されている。FRPロッドは軽量、高引張強度、耐蝕性、非帯磁性など従来の補強材にない優れた特質を有している。反面、弾性係数が鉄筋よりも低く、コンクリートとの付着特性が異形鉄筋やPC鋼線などと大きく異なることや複合材料であることなど、補強材として適用するにあたって留意すべき点をいくつか有している[1]。

従来の研究ではFRPロッドを梁の主筋やせん断補強筋あるいはPCやPRC梁の緊張材の代替に適用した例が多い。しかし、ロッドの低弾性係数を考慮すると荷重が分散する面部材への適用も合理的と考えられる。また、研究の対象とする荷重は静的荷重が多く、繰返し荷重下での検討例などは比較的少ないようである。一方、土木構造物では静的耐荷挙動や繰返し疲労荷重下での挙動のみならず、動的荷重下における挙動把握や終局耐力の把握も極めて重要である。

このような背景から、著者らは衝撃荷重下におけるFRPロッドで補強したコンクリートスラブの衝撃特性を検討してきた[2]。その結果、スラブの振動減衰性や下端筋のひずみ分布の経時変化は補強筋の付着特性に影響されることが考えられた。また、スラブ裏面のひびわれ性状は補強筋の付着特性の他に剛性にも影響されるが、最大衝撃力は補強筋の剛性や付着特性には顕著に影響されないことが判った。しかし、従来の研究はスラブに貫通や裏面剝離が生じない程度の弾性から塑性状態に着目しており、補強筋の剛性や付着特性がスラブの耐衝撃性に与える影響は検討されていなかった。そこで本研究では、従来の供試体よりもスラブ厚を薄くかつ補強筋を単筋配置とし、自由落下させる重錘の重量を増加させることでスラブが衝撃破壊するように計画し、補強筋の剛性や付着特性がスラブの耐衝撃性に与える影響を比較検討した。

2. 供試体の概要

表-1に供試体の一覧を示す。供試体に用いた補強筋は4種類で、1補強筋種類について2体の合計8体のスラブを製作し実験を行った。補強筋は組紐状AFRPロッド表面に5号珪砂を接着した砂つきロッドと無処理の砂なしロッドおよび剛性と付着特性の影響を比較検討するために丸鋼および異形鉄筋とした。同一補強筋での2体のスラブで、自由落下させる鋼製重錘の重量を70kgf、100kgfの2種類とした。また、重錘の載荷速度は1m/secから1m/sec刻みで、

表-1 供試体の一覧

スラブの名称	補強筋の種類	重錘重量
AC-1	砂なしロッド	70kgf
AC-2	K32	100kgf
AsC-1	砂つきロッド	70kgf
AsC-2	K32S	100kgf
RC-1	丸鋼	70kgf
RC-2	R6	100kgf
DC-1	異形鉄筋	70kgf
DC-2	D6	100kgf

重錘重量が70kgfの場合は試験装置の制約から最大で7.7m/sec、100kgfの場合は7.5m/secまで行った。なお、最大速度でも破壊しない供試体は破壊するまで最大速度で繰返し载荷を行った。

コンクリートスラブの寸法は150cmX150cmX7cmで、スラブ厚が薄くかつ衝撃破壊させるために補強筋の配置はかぶり1cmの単筋直交配置とした。各補強筋はほぼ同様な断面積であり、全スラブで補強筋を50mmの同一ピッチで配置した。補強筋比は片側で約1%である。図-1にスラブの配筋とひずみゲージの取り付け位置を示す。

表-2 コンクリートの特性

供試体名	材料試験材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比	単位重量 (tonf/m ³)
ACスラブ AsCスラブ RCスラブ DCスラブ	28	461	2.71 ×10 ⁵	0.195	2.314

表-3 補強筋の特性

補強筋名	砂なしロッド K32	砂つきロッド K32S	丸鋼 R6	異形鉄筋 D6
材質	アラミド繊維	同左	SR30	SD30A
(公称) 直径 (mm)	6	7	5.87	5.75
(公称) 断面積 (cm ²)	0.25	同左	0.27	0.26
密度 (g/cm ³)	1.30	同左	7.85	7.85
引張耐力 (tonf)	2.8	同左	1.2	1.1
降伏耐力 (tonf)	—	—	0.81以上	0.78以上
弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	0.67	同左	2.10	2.06
弾性伸び (%)	1.67	同左	0.20	同左
ポアソン比	0.60	同左	0.28	0.27

コンクリートの特性を表-2に示す。コンクリートは粗骨材の最大寸法が15mmのレデーミクストコンクリートで、W/Cが46.9%、単位セメント量は432kgである。衝撃試験の材令は35~37日である。

表-3に補強筋の特性を示す。組紐状AFRPロッドは直径12μのアラミド繊維を組紐機で編み上げた後樹脂を含浸硬化させて成形した。砂つきのロッドは樹脂が硬化する前にロッド表面に珪砂を接着させて成形した。繊維の重量含有率は約70%であり、組紐の凹凸はロッドの直径の10倍の区間内に4箇所ある。補強筋の特性はAFRPロッドで試験片3本、鉄筋で4本の実測値の平均値である。なお、鉄筋の降伏耐力および弾性伸びは規格値を示した。

ロッドは降伏点のない弾性体で弾性伸び範囲は鉄筋の8倍程度にまで達する。ロッドの弾性係数は鉄筋の約1/3程度と低い引張耐力は鉄筋の2.3~2.5倍程度と大きい。

砂つきロッドの付着強度は文献[3]より、すべり量が0.2mm程度の小さな領域では異形鉄筋とほぼ同等である。また、砂なしロッドの付着強度は領域によらず丸鋼よりも高いがすべり量が小さな領域では異形鉄筋よりも低く、すべり量が増えるにしたがい付着強度が増加する傾向を有している。

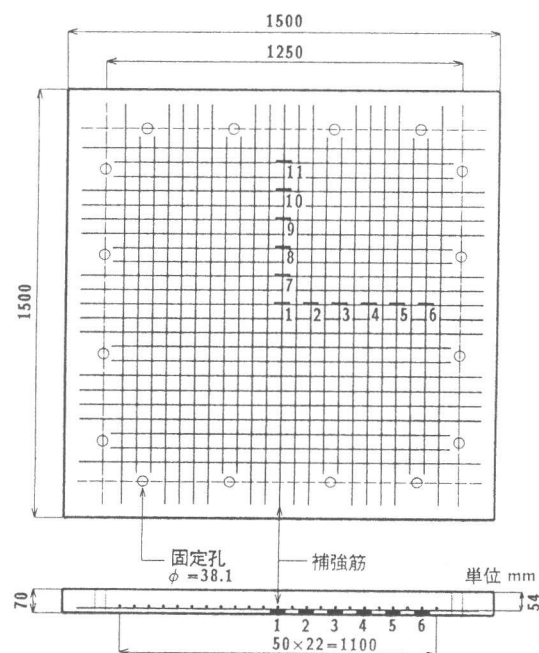


図-1 スラブの配筋とひずみゲージの取り付け位置

3. 衝撃実験の概要

衝撃実験は室蘭工業大学に設置されている落下衝撃万能試験機を用いて行った。衝撃荷重は直径15cmで重量が70kgf、100kgfの鋼製の円柱からなる重錘を所定の高さにセットした後スラブ中央に自由落下させて載荷した。スラブの支持は矩形版の4辺を上下から鋼製のローラーではさむ単純支持方式とした。

測定点は重錘の両側面に取り付けた容量1000Gのひずみゲージ型加速度変換器2点と下端補強筋に取り付けたひずみゲージ11点である。衝撃荷重載荷ごとに加速度およびひずみ波形を記録し、交番応力により発生するスラブ表面のひびわれ状況を調査した。また、全載荷が終了した後スラブ裏面のひびわれ状況を調べ、スラブ表面に生じた押抜け部の貫入量を測定した。

4. 実験結果および考察

4. 1 スラブの耐衝撃性

表-4に耐衝撃性の観点からスラブ破壊時における各種測定値を示した。なお、本実験ではスラブの衝撃破壊をスラブ表面に押抜け部が形成され目視で貫入が確認された状況と定義した。表-4より、同一補強筋比で補強したスラブの破壊時における重錘の載荷速度および回数から見た耐衝撃性は、

重量 70kgfの

重錘を用いた

ケースでは

AsC スラブが

最も優れ、RC、

DC、ACスラブ

の順に劣ること

が判る。

一方、100

kgf 載荷でも

表-4 スラブ破壊時の各種測定値

スラブ の名称	重錘重量 (kgf)	載荷速度 (m/sec)	最大加速度 (G)	全残留ひずみを 加算した測点1 の最大ひずみ ($\times 10^{-6}$)	最終載荷におけ る測点1の残留 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	押抜け部 貫入量 (mm)
AC-1	70	1~7	1,015	5,882	100	5.0
AC-2	100	1~7	546	10,108	877	6.1
AsC-1	70	1~7, 7.7 $\times 4^*$	955	3,240**	74	3.8
AsC-2	100	1~7, 7.5	724	9,160	514	7.3
RC-1	70	1~7, 7.7 $\times 2$	1,094	15,496	1,670	12.0
RC-2	100	1~7	645	8,101	1,715	20.7
DC-1	70	1~7, 7.7	1,380	11,213	3,538	18.0
DC-2	100	1~7	683	17,587	644	2.0

* $\times 4$ は繰返し回数を示す。 ** 測点2のほうが大きく、 $15,465 \times 10^{-6}$

70kgf載荷と同様に、重錘の載荷速度および回数から見た耐衝撃性はAsCスラブが最も優れており、他のスラブはすべて1回目の7m/sec載荷で破壊している。これらから、砂つきのロッドを用いたスラブの重錘の載荷速度および回数から見た耐衝撃性は他のスラブに比べて明らかに優れており、他のスラブはほぼ同程度の耐衝撃性を有していると考えられる。最大加速度は70kgf載荷で1000G~1400G程度、100kgf載荷で500G~700G程度であり、補強筋の剛性や付着特性による顕著な差異は見られなかった。しかし、70kgfと100kgf載荷を比較すると、70kgfは100kgf載荷の1.71倍程度と大きくなっており、この比率は重錘の重量比率1.43倍よりも大きくなっている。

すべての残留ひずみを加算した下端筋の測点1のひずみは、AFRPロッドを用いたスラブでAsC-1を除いて6000~10000 μ 程度、鉄筋を用いたスラブではこれより大きく8000~18000 μ 程度である。これより、ロッドは弾性ひずみの範囲内にあるが鉄筋は降伏点を大きく超えていることが判る。そのため、鉄筋のDC-2スラブを除いた最終載荷における測点1での残留ひずみはAFRPロッドに比べて大きい。次に、重錘の底面に等しい範囲で押抜けた部分の貫入量は、DC-2スラブを除いて、鉄筋で補強したスラブのほうがAFRPロッドで補強したスラブよりも大きく、鉄筋で補強したスラブは衝撃力が載荷点に集中しやすい傾向にあることが判る。

4. 2 応答ひずみ波形の概要

図-2に100kgf载荷での衝撃破壊した载荷速度における下端筋の応答ひずみ波形を示す。

図より、载荷点直下にひずみが残留する度合いは鉄筋を用いたスラブで顕著であり、特に丸鋼を用いたスラブではひずみの残留する度合いが高いことが判る。

一方、AFRPロッドを用いたスラブの载荷点直下ではひずみの残留する度合いが低く、特に砂つきのロッドを用いたスラブはひずみの残留する度合いが小さい。

次に、载荷点と支点の中間付近の測点

4、5において鉄筋とロッドを用いたスラブでひずみの残留度合いを比較すると、ロッドで補強したスラブのほうがひずみの残留する度合いが高いことが判る。以上から、鉄筋のように剛性の高い補強筋を用いたスラブでは、主として载荷点近傍で衝撃力に抵抗するものと考えられる。一方、ロッドのように剛性の低い補強筋を用いたスラブでは、ロッドの弾性伸び量が大きいため鉄筋で補強したスラブよりも全体的な変形性能で抵抗することが考えられる。なお、破壊直前におけるスラブの振動減衰性を载荷点と支点の中間付近で比較すると、RC-2の測点9で顕著なように、鉄筋を用いたスラブの振動減衰性はロッドを用いたスラブのそれよりも低いことが判る。

4. 3 スラブのひびわれ性状

図-3にスラブ表面のひびわれ性状を、図-4にスラブ裏面のひびわれ性状を示す。ここでは、70kgfと100kgf载荷でのひびわれ性状に顕著な差異が見られなかったので70kgf载荷での性状を示した。スラブ表面のひびわれ性状をACとAsCスラブで比較すると、円周方向のひびわれ本数はAsCがACスラブよりも多く、ひびわれの発生領域も広くかつ間隔もせまいことが判る。また、ACスラブでは载荷点と四隅を結ぶ対角線状のひびわれが顕著に発生しているが、AsCスラブでは対角線状のひびわれの直進性および連続性が乏しくなっている。

次に、RCとDCスラブのひびわれ性状を比較すると、円周方向のひびわれの本数および範囲と間

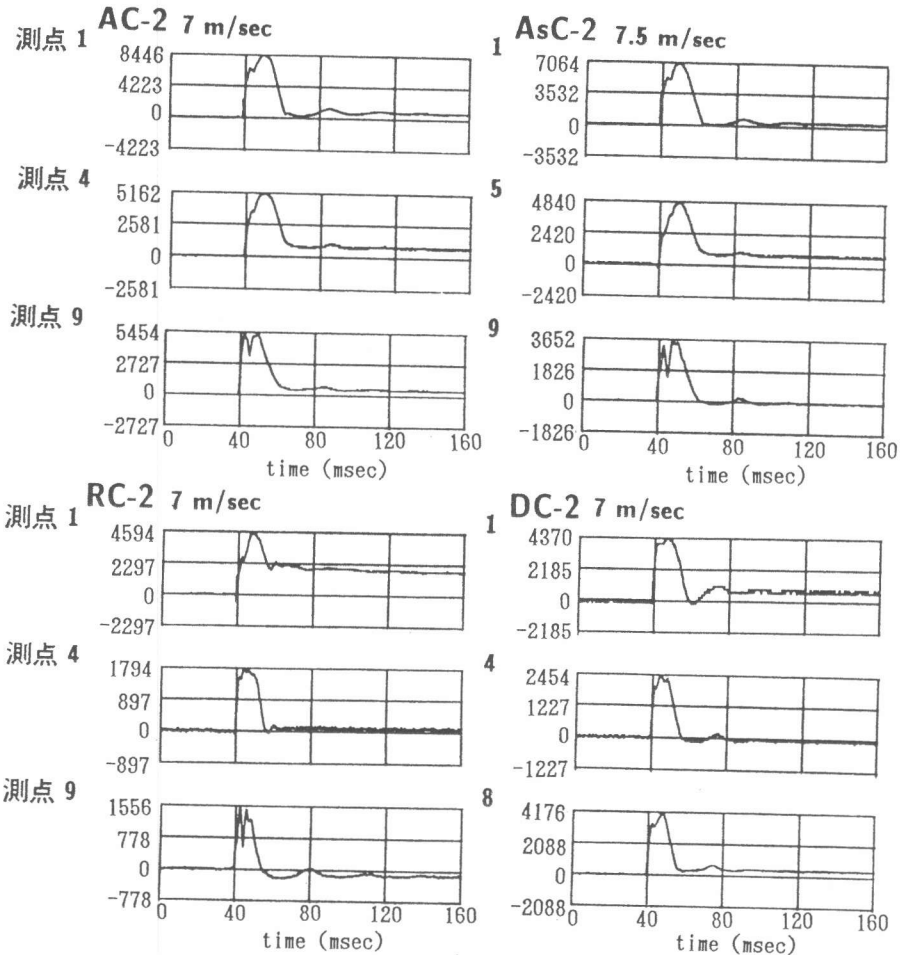


図-2 応答ひずみ波形

隔は両者ではほぼ同様である。一方、半径方向のひびわれはRCスラブではACスラブと同様に載荷点から四隅に向けて直進しかつ連続して発生している。これに対し、DCスラブではAsCスラブと同様に半径方向のひびわれの直進性および連続性が乏しくなっている。

以上から、ロッドを用いたスラブでは付着特性が円周方向のひびわれの分散性や範囲に顕著な影響を与え、付着強度の高い砂つきのロッドのほうが広域的にスラブを補強していることが判る。一方、鉄筋およびロッドで補強したスラブの半径方向のひびわれも付着特性に影響され、各々付着強度の高いほうを用いると直進性や連続性が乏しくなる傾向がある。これは、低載荷速度で発生するひびわれが付着強度の高いものは円周状に、低いものは対角線状になりやすいことを示すと考えられる。

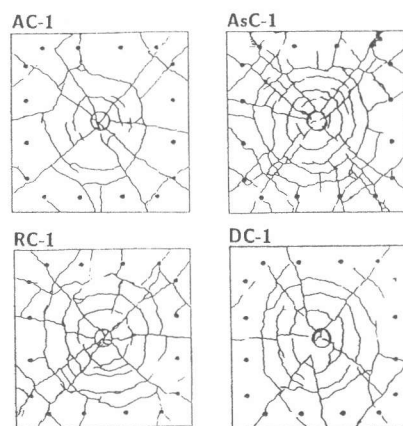


図-3 表面のひびわれ性状

スラブ裏面のひびわれ性状をACとAsCスラブで比較すると、AsCスラブのほうが円周状および放射状のひびわれが多く、ひびわれの分散性が良好でありかつ円周状のひびわれがより広範囲に生じている。これは、ロッドの弾性係数が低いためにスラブが全体的に変形して衝撃力に抵抗するが、その傾向が付着強度の高いものほど顕著であることを示すものと考えられる。

次に、RCとDCスラブの性状を比較すると、RCスラブでは裏面剝離部分の外側にも円周状のひびわれが生じているがDCスラブにはそれが生じていない。また、RCスラブでは放射状のひびわれが広範囲に比較的密に発生しているが、DCスラブでは載荷点近傍の裏面剝離が顕著であり放射状のひびわれは比較的少ない。

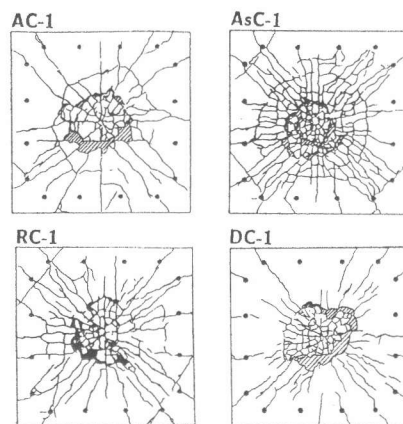


図-4 裏面のひびわれ性状

これは、鉄筋を用いたスラブでは剛性が高いため載荷点近傍の鉄筋が大きな応力を負担するが、弾性伸び能力が低いため降伏し損傷が載荷点近傍で顕著になるためと考えられる。すなわち、ひびわれ性状には剛性と付着特性が影響

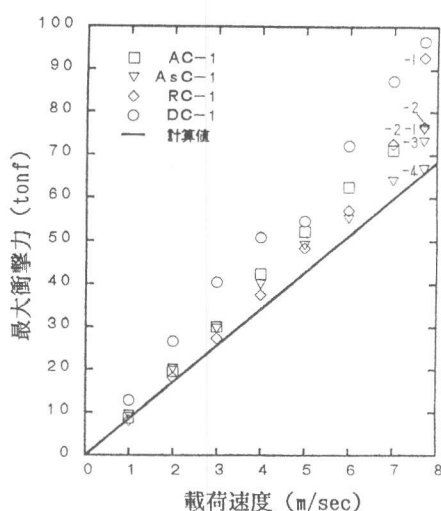
を与え、剛性の低い補強筋では付着強度が高いものほどスラブは全体変形を示しやすく、剛性の高い補強筋では付着が良好であると一層応力が集中し局部変形しやすいことが考えられる。

4. 4 最大衝撃力

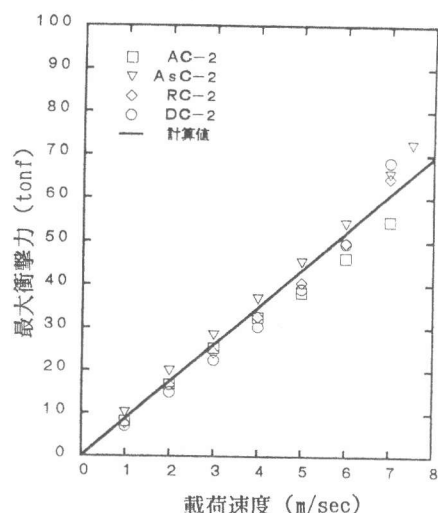
図-5の(a)、(b)に各々70kgf、100kgf載荷でのスラブの最大衝撃力と載荷速度の関係を示す。また、文献[4]に基づいた弾性接触論による計算結果を合わせて示した。最大衝撃力の実験値は重錘の最大加速度の平均値に重錘の重量を乗じて求めた。図-5(a)より、70kgf載荷では計算値の最大衝撃力と載荷速度の関係はほぼ実験値の下限値を与えることが判る。また、一般的に載荷速度が大きくなるにしたがい最大衝撃力が増加している。なお、最大速度で複数回の衝撃載荷を行うと、スラブの塑性化が徐々に顕著となり最大衝撃力が低下することが判る。

一方、100kgf載荷では実験値と計算値は比較的良く一致しており、最大衝撃力は補強筋の剛性や付着特性に関わらず弾性接触論を用いてある程度の精度で評価できることが判る。70kgf載荷

の最大衝撃力が100kgfよりも大きいのは、同一のスラブに対して重量の軽い重錘が作用するほうがスラブの載荷点変位が小さくなり、見かけ上スラブの剛性が高くなるのと同様な影響を与えるためと考えられる。



(a) 70kgf載荷



(b) 100kgf載荷

図-5 最大衝撃力と載荷速度の関係

5. まとめ

同一補強筋比で補強したスラブの耐衝撃性に与える補強筋の剛性および付着特性の影響を重錘を自由落下させる室内実験により比較検討した。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、

- (1) 本実験でのスラブの破壊形式は重錘がスラブ表面に貫入するいわゆる貫入破壊であった。
スラブ破壊時の重錘の載荷速度および載荷回数から見た耐衝撃性は、砂つきのAFRPロッドを用いたスラブが最も優れ、他はほぼ同程度であった。
- (2) 補強筋の剛性はひずみの残留する度合いに大きな影響を与え、鉄筋を用いたスラブでは載荷点直下で残留する度合いが高く、AFRPロッドを用いたスラブでは載荷点と支点の中間付近で残留する度合いが高い。
- (3) 補強筋の剛性および付着特性はスラブ表裏面のひびわれ性状に大きな影響を与え、これはまたスラブの変形性状に密接に関連している。
- (4) 最大衝撃力の計算値は70kgf載荷では実験値の下限值を与え、100kgf載荷では実験値と比較的良好に一致した。また、最大衝撃力の実験値はいずれの載荷でも補強筋の剛性や付着特性に顕著には影響されない。

本論文を作成するにあたり、室蘭工業大学建設システム工学科の松岡健一教授ならびに大学院生の松岡篤君に多大なるご支援をいただきました。記して謝意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 三上浩ほか：組紐状AFRPロッドで補強したコンクリートはりの疲労特性に関する実験的研究
土木学会論文集、第427号／VI-14、pp.85-94、1991.3
- 2) 三上浩ほか：組紐状AFRPロッドで補強したコンクリートスラブの衝撃特性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、13-2、pp.861-866、1991
- 3) 岡本直ほか：アラミド繊維による組紐状棒材の研究（その3．付着性状Ⅰ引抜き試験結果）
日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.829-830、1988.10
- 4) 大沼博志：コンクリート構造物の高温クリープと衝撃応答特性に関する研究、北海道大学学位論文、1984